

Разработка и испытания противообледенительной системы обогрева судовых воздухозаборных решеток

© Ю.И. Димитриенко¹, В.Ю. Чибисов¹,
А.Г. Кирчанов², Р.Ю. Ворошилов²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

² Группа компаний «Би Питрон», Санкт-Петербург, 191014, Россия

Представлены результаты разработок отечественной технологии создания противообледенительных систем обогрева воздухозаборных решеток, применяемых в судовых системах вентиляции и кондиционирования. Разработаны и изготовлены экспериментальные образцы противообледенительной системы обогрева (ПСО). На основании климатических испытаний разработанной ПСО воздухозаборных решеток показано, что эта система полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям к эксплуатации в арктических условиях при температуре до -60 °С. Разработанная ПСО может быть использована для защиты от обледенения воздухозаборных решеток в составе судовых систем вентиляции ледоколов, подобных атомным ледоколам серии «Москва», предназначенных для эксплуатации в арктических условиях.

Ключевые слова: *противообледенительные судовые системы, воздухозаборные решетки, электронагревательные системы, теплообмен, климатические испытания, математическое моделирование.*

Введение. В настоящее время большое значение приобрела проблема развития арктических территорий России и освоения океанского шельфа для добычи полезных ископаемых, а также нефте- и газопродуктов. В связи с этим важной задачей российского судостроения является создание специальных судов для плавания в высоких широтах, в том числе перспективного ледокольного флота. Одна из серьезных проблем, которые приходится преодолевать проектировщикам арктических судов, — борьба с обледенением ответственных частей судовых конструкций, в том числе воздухозаборников систем вентилирования и кондиционирования воздуха жилых и производственных помещений [1, 2]. При обледенении решеток систем вентиляции сужается поперечное сечение воздухозаборных трактов, уменьшается количество воздуха, поступающего в судовые системы, что может вывести их из строя.

В настоящее время у судостроителей нет большого опыта в проектировании систем защиты от обледенения вентиляционных решеток [3–6]. Опыт проектирования систем обогрева труб и емкостей общепромышленного назначения, имеющийся у таких мировых лидеров в области разработки промышленных систем обогрева, как

Tusco Thermal Controls [7], оказывается недостаточным для выполнения поставленных задач.

Одна из первых попыток обогрева вентиляционных решеток с жалюзи выразилась в разработке специалистами ООО «Би Питрон» и ОАО ЦКБ «Айсберг» способа обогрева и устройства для его осуществления [8]. Была предусмотрена прокладка греющих кабелей снаружи по обечайке и ребрам жесткости решетки с целью передачи тепла по металлу от указанных нагретых деталей жалюзи решетки. Однако численное моделирование процесса показало низкую эффективность такого способа. Тем же авторским коллективом, в связи с указанным обстоятельством, разработаны способ и устройство, предусматривающие выполнение ребер жесткости полыми и прокладку греющих кабелей внутри ребер жесткости. Однако этот способ обогрева вследствие ограниченности контакта греющего кабеля с обогреваемыми деталями и низкой теплопроводности стали не обеспечивает прогрева жалюзи до температуры, необходимой для защиты их от обледенения даже при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже, а тем более при арктических температурах.

В настоящей работе изложены результаты исследований по созданию нового способа обогрева воздухозаборных решеток и устройства системы для его осуществления, которые легли в основу содержания патентов [9, 10]. Представлены также результаты испытаний системы обогрева воздухозаборной решетки.

Общий вид и устройство противообледенительной системы обогрева судовых воздухозаборных решеток. Противообледенительная система обогрева судовых воздухозаборных решеток (ПСО СВР) была разработана в Научно-образовательном центре «Симплекс» МГТУ им. Н.Э. Баумана в содружестве с ООО «Би Питрон» (г. С.-Петербург) в рамках выполнения работ по Федеральной целевой программе «Развитие гражданской морской техники на 2009–2016 гг.».

Предназначенная для защиты воздухозаборных решеток судовых систем вентиляции от обледенения при воздействии отрицательных температур до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, ПСО СВР имеет модульную структуру (рис. 1), число модулей определяется габаритами обогреваемых воздухозаборных решеток судна [11].

В состав ПСО СВР входят следующие основные части (рис. 2):

- корпус обогреваемой воздухозаборной решетки, включающий в себя силовую раму, систему пустотелых жалюзи, ребра жесткости, а также теплопроводящий наполнитель, находящийся внутри пустотелых жалюзи;
- комплекс электронагревательных кабелей;
- система управления электропитанием и обогревом.



Рис. 1. Общий вид разработанного модуля ПСО СВР

Торцы элементов ребер жесткости выполнены вогнутыми соответственно выпуклым обводам жалюзи. Комплекс электронагревательных кабелей проложен внутри жалюзи и/или ребер жесткости. Переход комплекса электронагревательных кабелей из одной части жалюзи в другую осуществляется через торцы этих частей. Обрамляющая рама соединена с наружными торцевыми частями ребер жесткости.

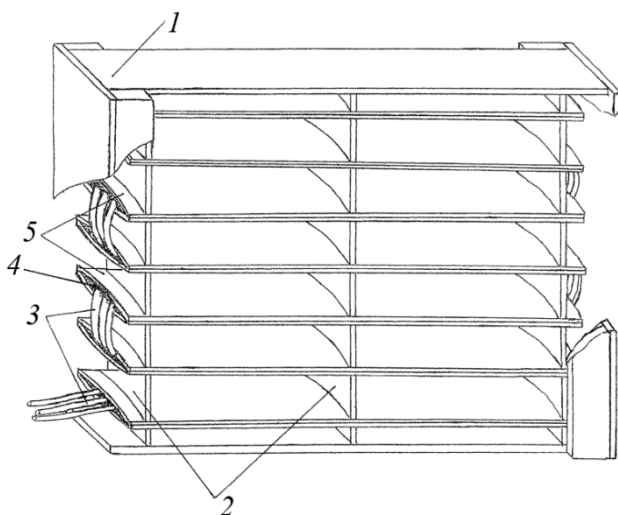


Рис. 2. Принципиальная схема конструкции ПСО СВР:
1 — теплопроводящий наполнитель; 2 — ребра жесткости; 3 — комплекс электронагревательных кабелей; 4 — рама; 5 — жалюзи

Наличие теплопроводящего заполнителя обеспечивает поступление практически всего тепла, выделяемого электронагревательным кабелем, на жалюзи непосредственно, без потерь при передаче его через другие металлические детали, имеющие высокое тепловое сопротивление. Элементы ребер жесткости в этом устройстве имеют размер по вертикали не более 50 мм, вследствие чего прогреваются по всей длине. Предложенный способ и устройство обеспечивают защиту вентиляционной решетки с жалюзи от обледенения при температуре наружного воздуха до $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Разработанный способ и устройство эффективны и экономичны. Система управления электронагревом позволяет регулировать мощность тепловыделения.

Оптимизация конструкции ПСО СВР. Для выбора оптимального значения геометрических параметров конструкции ПСО СВР, главным образом расстояний между отдельными элементами жалюзи, а также жалюзи и ребрами жесткости, было проведено численное моделирование тепловых процессов в конструкции при различных вариантах геометрических параметров. Описание методики моделирования изложено в [12]. Некоторые результаты численного моделирования показаны на рис. 3–5.

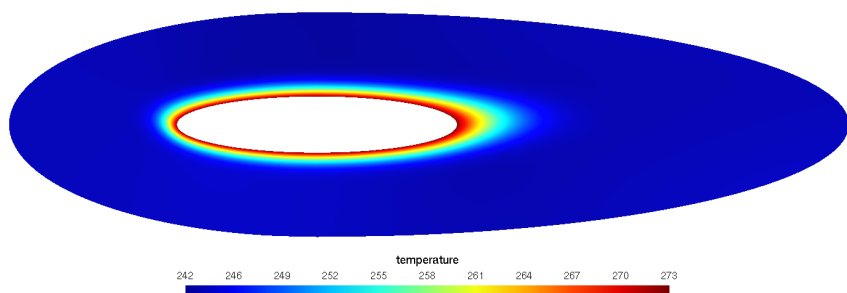


Рис. 3. Расчетное температурное поле воздушного потока, обтекающего конструкцию жалюзи СВР при температуре холодного воздуха $\theta_e = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорости потока воздуха 20 м/с и плотности теплового потока системы электронагрева $q_W = 210\text{ Вт/м}^2$

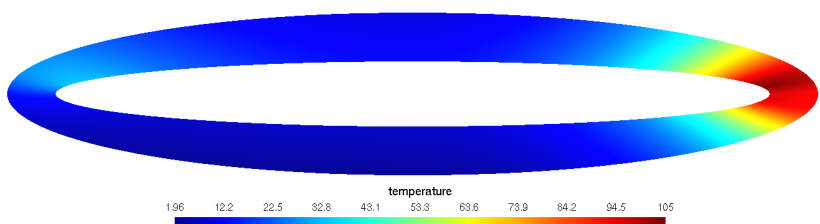


Рис. 4. Расчетное температурное поле в конструкции створки жалюзи СВР при температуре холодного воздуха $\theta_e = -50\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорости потока воздуха 20 м/с и плотности теплового потока системы электронагрева $q_W = 550\text{ Вт/м}^2$

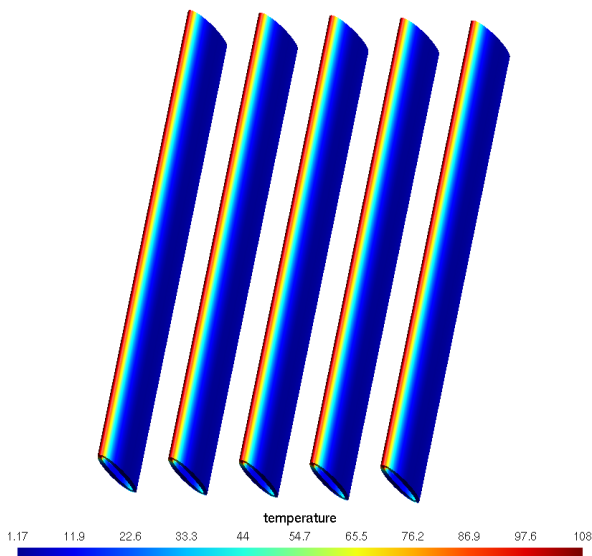


Рис. 5. Расчетное температурное поле на внешней поверхности створок жалюзи СВР при температуре холодного воздуха $\theta_e = 50\text{ }^\circ\text{C}$, скорости потока воздуха 20 м/с и плотности теплового потока электронагрева $q_W = 670\text{ Вт/м}^2$

Математическое моделирование тепловых процессов в конструкции СВР позволило найти оптимальные расстояния между ребрами жесткости. При расстоянии большем оптимального система электронагрева не обеспечивает выполнение поставленной задачи — сохранения положительной температуры ($+2\text{ }^\circ\text{C}$) на поверхности жалюзи (рис. 6).

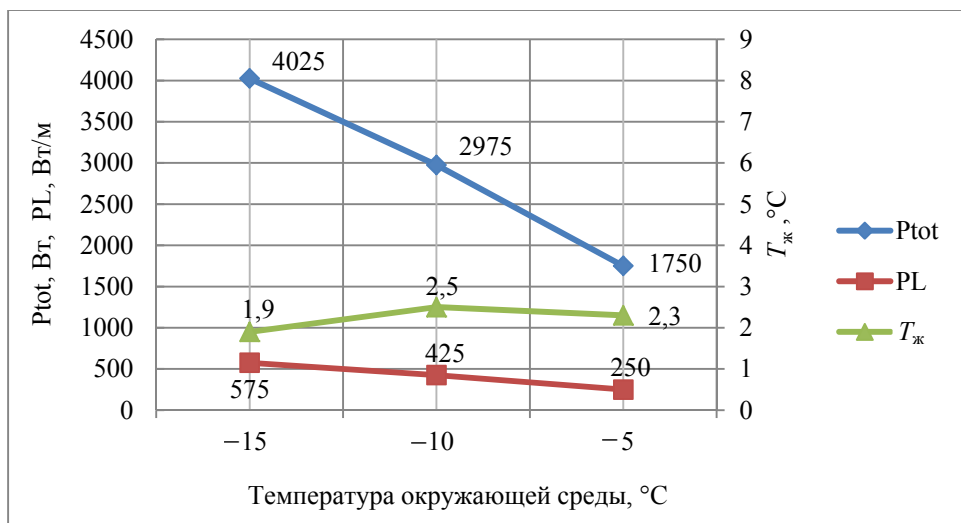


Рис. 6. Расчетные зависимости требуемой мощности P_{tot} и удельной мощности PL системы электронагрева СВР (для обеспечения температуры $T_{ж}$ жалюзи) от температуры окружающей среды

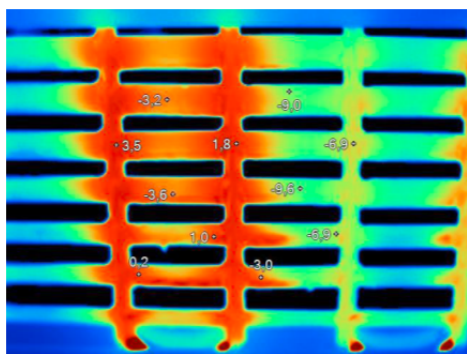
Испытания ПСО СВР. На испытательной базе ЗАО «НПЦ «Акварин»» были проведены климатические испытания разработанной ПСО СВР. Испытательный стенд представлял собой климатотермокамеру R-60-608СВІ, обеспечивающую возможность поддержания температуры в диапазоне $-60 \dots +80$ °С и влажности до 95 %. Внутри климатотермокамеры на монтажной раме был подвешен опытный образец ПСО СВР (рис. 7). Питание опытного образца системы обогрева воздухозаборных решеток обеспечивалось стендовым источником питания переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц. При испытаниях ПСО СВР функционировала в двух режимах: в режиме I была задействована половина электронагревающего кабеля, в режиме II — весь кабель.



Рис. 7. Опытный образец ПСО СВР в климатотермокамере

Испытуемая воздухозаборная решетка была подвешена на деревянной раме и подвергалась охлаждению от 0 °С до предельно низкой температуры, которую возможно создать в климатотермокамере. При этом скорость движения воздуха в климатотермокамере была в пределах 1...2 м/с. В ходе испытаний температуру поверхности жалюзи решеток определяли с помощью тепловизионной съемки тепловизио-

ром Fluke Ti32, а также визуально и органолептически по наличию обледенения смоченных марлевых полосок, накладываемых на жалюзи. Степень обледенения определяли по наличию одного из трех состояний: 1) нет обледенения — полное отсутствие льда на поверхности ячейки; 2) частичное обледенение — часть поверхности ячейки покрыта льдом; 3) полное обледенение — поверхность ячейки покрыта льдом полностью. Перед снятием очередных показаний решетка находилась в камере при заданной температуре не менее 30 мин.



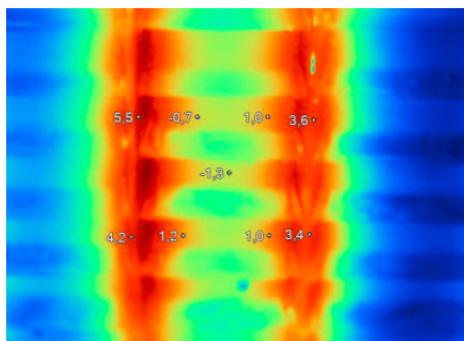
a



б

Рис. 8. Испытания ПСО СВР, функционирующей в режиме I (толщина пластин 3 мм, секция 3, температура окружающей среды $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$):

a — температурное поле решетки, полученное с помощью тепловизора; *б* — изображение ПСО СВР в видимом свете, полученное с помощью видеокамеры



a



б

Рис. 9. Испытания ПСО СВР, функционирующей в режиме I (толщина пластин 6 мм, секция 4, температура окружающей среды $-43\text{ }^{\circ}\text{C}$):

a — температурное поле решетки, полученное с помощью тепловизора; *б* — изображение ПСО СВР в видимом свете, полученное с помощью видеокамеры

Некоторые результаты испытаний приведены на рис. 8–10. Было установлено, что данная конструкция СВР обеспечивает ее защиту от обледенения при температуре окружающей среды до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, если включен один греющий кабель, и до $-59,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ при включении двух греющих кабелей.

Результаты стендовых испытаний опытного образца ПСО СВР системы вентиляции подтверждают эффективность системы обогрева при ее работе в условиях пониженных температур окружающей среды вплоть до $-59,3$ °С (см. рис. 10).

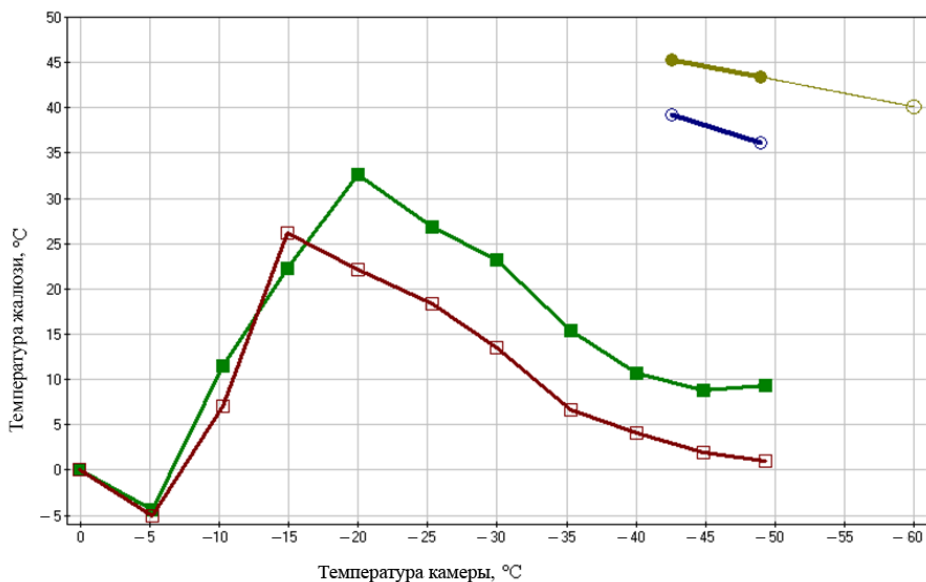


Рис. 10. Графики функций эффективности обогрева ПСО СВР для разных режимов работы и температуры в камере:

■—■—■ — один греющий кабель с теплопроводящим наполнителем; □—□—□ — один греющий кабель без теплопроводящего наполнителя; ●—●—● — два греющих кабеля с теплопроводящим наполнителем; ○—○—○ — два греющих кабеля без теплопроводящего наполнителя

На рис. 10 видны следующие зоны: а) зона падения температуры жалюзи вместе с температурой камеры при выключенном обогреве (температура камеры $0...-5$ °С); б) зона прогрева жалюзи во время дальнейшего охлаждения камеры при включенном обогреве (температура камеры $-5...-20$ °С); в) зона падения температуры жалюзи в рабочем режиме обогрева во время дальнейшего охлаждения камеры (температура камеры $-15...-50$ °С).

Испытания показали, что при заполнении пустот в жалюзи теплопроводящим составом значительно увеличилась теплопроводность решетки, а это, в свою очередь, в зависимости от температуры в камере и числа подключенных обогревающих кабелей привело к повышению температуры обогреваемой решетки при установившихся режимах работы на $6...10$ °С.

Перспективы использования ПСО СВР. Разработанная ПСО СВР может быть использована для защиты от обледенения воздухозаборных решеток в составе судовых систем вентиляции ледоколов,

(типа атомных ледоколов серии «Москва» — рис. 11), предназначенных для эксплуатации в арктических условиях. Существует возможность применения созданной ПСО СВР для перспективных ледоколов, разрабатываемых в соответствии с проектом 22220 (ЛКС-60Я) и предназначенных для применения в условиях Арктики.



а



б

Рис. 11. Атомный ледокол «Москва»: а — общий вид; б — воздухозаборные решетки

Выводы. Разработана отечественная технология создания ПСО СВР систем вентиляции и кондиционирования.

Проведенное математическое моделирование тепловых режимов функционирования воздухозаборных решеток с системой электронагрева позволило выбрать оптимальные значения конструктивных параметров ПСО СВР и установить наиболее эффективные режимы электрообогрева воздухозаборных решеток при температуре эксплуатации до -60°C .

Разработаны и изготовлены экспериментальные образцы ПСО СВР.

Проведены климатические испытания созданной ПСО СВР, на основании которых выполнена доработка конструкции противообледенительной системы. Испытания доработанной противообледенительной системы показали, что она полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям и пригодна для эксплуатации в арктических условиях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Захаров Ю.В. *Судовые установки кондиционирования воздуха и холодильные машины*. Ленинград, Судостроение, 1972, 566 с.
- [2] Языков В.Н. *Теоретические основы систем кондиционирования воздуха*. Ленинград, Судостроение, 1967, 234 с.
- [3] Feher L., Thumm M. Design of Avionic Microwave De-/Anti-Icing Systems. In: Willert-Porada M., ed. *Microwave devices*. Springer, 2006, pp. 695–702.
- [4] Petrenko V.F., Sullivan C. *methods and Systems for Removing Ice from Surfaces*. Patent US 6,653,598 B2, 2003.

- [5] *Actual Anti-Icing Systems*. URL: <http://www.tpub.com/gunners/207.htm> (дата обращения 03.11.2015).
- [6] Lozowski E., Szilder K., Makkonen L. Computer simulation of marine ice accretion. *Philosophical Trans of the Royal Society: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2000, vol. 358, pp. 2811–2845.
- [7] http://raychem.kz/tyco_thermal_controls/ (дата обращения 02.11.2015).
- [8] Кирчанов А.Г., Кокотков В.В., Рыжков А.В., Гаврилов А.Ю. *Способ обогрева вентиляционных решеток с жалюзи и устройство для его осуществления*. Патент РФ № 2474766, 2013.
- [9] Кирчанов А.Г., Кокотков В.В., Димитриенко Ю.И., Рыжков А.В., Гаврилов А.Ю. *Способ защиты воздухозаборных решеток с жалюзи от обледенения и устройство для его осуществления*. Патент РФ № 2563715, 2015.
- [10] Кирчанов А.Г., Кокотков В.В., Димитриенко Ю.И. *Крупногабаритная воздухопроемная решетка с обогреваемыми жалюзи*. Патент РФ № 2563714, 2015.
- [11] Кирчанов А.Г., Димитриенко Ю.И., Чибисов В.Ю., Краснов И.К. *Способ контроля обледенения жалюзи воздухоприемной решетки*. Патент РФ № 2563710, 2015.
- [12] Димитриенко Ю.И., Коряков М.Н., Чибисов В.Ю. Численное решение сопряженной задачи газодинамики и теплообмена для воздухозаборной решетки с противообледенительной системой. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 9 (21). URL: <http://engjournal.ru/articles/1116/1116.pdf>

Статья поступила в редакцию 03.11.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Димитриенко Ю.И., Чибисов В.Ю., Кирчанов А.Г., Ворошилов Р.Ю. Разработка и испытания противообледенительной системы обогрева судовых воздухозаборных решеток. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 12. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pmce/mdpr/1453.html>

Димитриенко Юрий Иванович — д-р физ.-мат. наук, заведующий кафедрой «Вычислительная математика и математическая физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана, директор Научно-образовательного центра «Суперкомпьютерное инженерное моделирование и разработка программных комплексов» МГТУ им. Н.Э. Баумана, действительный член Академии инженерных наук. Автор более 300 научных работ в области механики сплошных сред, вычислительной механики, газодинамики, механики композитов, математического моделирования в науке о материалах.
e-mail: dimit.bmstu@gmail.com

Чибисов Виктор Юрьевич — заместитель директора Научно-образовательного центра «Суперкомпьютерное инженерное моделирование и разработка программных комплексов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор ряда научных работ в области разработки судовых систем электронагрева, диагностики и электросейсморазведки.
e-mail: vitek2003@list.ru

Кирчанов Алексей Григорьевич — ведущий специалист группы компаний «Би Питрон». Автор научных работ в области кораблестроения.
e-mail: kirchanov@beepitron.com

Ворошилов Родион Юрьевич — ведущий специалист группы компаний «Би Питрон». Автор нескольких научных работ в области разработки судовых электротехнических кабельных систем. e-mail: voroshilov@beepitron.com

Development and testing of anti-icing heating system for ship air-inlet grids

© Yu.I. Dimitrienko¹, V.Yu.Chibisov¹,
A.G. Kirchanov², R.Yu. Voroshilov²

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

² Bee-Pitron, Saint Petersburg, 191014, Russia

The article presents the results of developing a domestic technology for creating an anti-icing system for air-inlet grid heating of ship ventilation and air conditioning. It describes designed and manufactured experimental specimens of the anti-icing system. Climatic tests conducted for the developed anti-icing system for air-inlet grid heating showed that the system completely met the operational requirements under exploitation temperatures up to -60 °C approximating the Arctic conditions. The developed heating system may be used for air-inlet grid anti-icing of ship ventilation of icebreakers designed to operate in Arctic conditions, the type of nuclear-powered icebreakers of the series "Moscow".

Keywords: anti-icing ship system, air-inlet grid, heating system, heat transfer, climatic testing, mathematical modeling

REFERENCES

- [1] Zakharov Yu.V. *Sudovyye ustanovki konditsionirovaniya vozdukha i kholodil'nyye mashiny* [Ship installations of air conditioning and refrigerators]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1972, 566 p.
- [2] Yazykov V.N. *Teoreticheskiye osnovy sistem konditsionirovaniya vozdukha* [Theoretically bases of air conditioning systems]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1967, 234 p.
- [3] Feher L., Thumm M. Design of Avionic Microwave De-/Anti-Icing Systems. In: Willert-Porada M., ed. *Microwave devices*. Springer, 2006, 792 p. ISBN 3540432523, pp. 695–702.
- [4] Petrenko V.F., Sullivan C. *Methods and Systems for Removing Ice from Surfaces*. US Patent 6,653,598 B2, 25 November 2003.
- [5] *Actual Anti-icing Systems*. Available at: <http://www.tpub.com/gunners/207.htm> (accessed 03.11.2015).
- [6] Lozowski E., Szilder K., Makkonen L. Computer simulation of marine ice accretion. *Philosophical Trans of the Royal Society: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2000, vol. 358, pp. 2811–2845.
- [7] http://raychem.kz/tyco_thermal_controls/ (accessed 02.11.2015).
- [8] Kirchanov A.G., Kokotkov V.V., Ryzhkov A.V., Gavrilov A.Yu. *Sposob obogreva ventilyatsionnykh reshetok s zhalyuzi i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [Way of heating of ventilating grates about blinds and the device for its implementation]. RF Patent no. 2 474 766. Publ. February 10, 2013.
- [9] Kirchanov A.G., Kokotkov V.V., Dimitrienko Yu.I., Ryzhkov A.V., Gavrilov A.Yu. *Sposob zashchity vozdukhozabornykh reshetok s zhalyuzi ot obledeneniya i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [Way of protection of air-intake lattices with blinds from frosting and the device for its implementation]. RF Patent no. 2563715. Publ. August 26, 2015.

- [10] Kirchanov A.G., Kokotkov V.V., Dimitrienko Yu.I. *Krupnogabaritnaya vozdukhopriyemnaya reshetka s obogrevayemyimi zhalyuzi* [Large-size air-reception lattice with the warmed blinds]. RF Patent no. 2563714. Publ. August 26, 2015.
- [11] Kirchanov A.G., Dimitrienko Yu.I., Chibisov V.Yu., Krasnov I.K. *Sposob kontrolya obledeneniya zhalyuzi vozdukhozabornoy reshetki* [Way of control of frosting of blinds of an air-reception lattice]. RF Patent no. 2563710. Publ. August 26, 2015.
- [12] Dimitrienko Yu.I., Koryakov M.N., Chibisov V. Yu. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 9 (21). Available at: <http://engjournal.ru/articles/1116/1116.pdf>

Dimitrienko Yu.I. (b. 1962) graduated from Lomonosov Moscow State University in 1984. Dr. Sci. (Phys.&Math.), Professor, Head of the Computational Mathematics and Mathematical Physics Department, Director of the Scientific-educational Center of Supercomputer Engineering Modeling and Program Software Development at Bauman Moscow State Technical University. Member of the Russian Academy of Engineering Science. Author of over 300 publications in the field of computational mechanics, gasdynamics, thermomechanics of composite materials, mathematical simulations in material science. e-mail: dimit.bmtstu@gmail.com.

Chibisov V.Yu. (b. 1989) graduated from Moscow State University of Applied Biotechnology in 2011. A deputy director of the Scientific-educational Center of Supercomputer Engineering Modeling and Program Software Development of Bauman Moscow State Technical University. Author of a number of scientific papers in the field of ship electrical heating system development, system for diagnostics and electric-seismic exploration. e-mail: vitek2003@list.ru

Kirchanov A.G. (b. 1933) graduated from the Pacific Highest Naval School named after S.O. Makarov in 1956. Leading specialist of the Bee-Pitron Group of Companies. Author of several scientific publications in the field of shipbuilding. e-mail: voroshilov@beepitron.com

Voroshilov R.Yu. (b. 1964) graduated from F. Dzerzhinsky Higher Naval Engineering School in 1986. Leading specialist of the Bee-Pitron Group of Companies. Author of several scientific publications in the field of ship electrical cable system development. e-mail: voroshilov@beepitron.com